

# 利用树木年轮宽度资料重建川西卧龙地区过去159年夏季温度的变化

李宗善<sup>1</sup> 刘国华<sup>1\*</sup> 张齐兵<sup>2</sup> 胡婵娟<sup>1</sup> 罗淑政<sup>1</sup> 刘兴良<sup>3</sup> 何 飞<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; <sup>2</sup>中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; <sup>3</sup>四川省林业科学研究院生态研究所, 成都 610081

**摘要** 根据川西卧龙地区林线位置岷江冷杉(*Abies saxoniana*)的年轮宽度资料, 分析了该地区树木年轮宽度与气候要素的关系, 并重建了该地区1850年以来夏季(6–8月份)温度的变化历史。结果表明: 川西卧龙地区在过去159年来的温度变化上, 最为明显的特征是20世纪40年代以来的显著变暖趋势, 而在20世纪40年代以前的温度明显偏低, 主要的低温时期在1850–1870年和1890–1930年。该温度序列的冷暖期与附近地区的冰芯、冰川进退资料, 以及对于夏季温度响应敏感的树轮年表都有着较好的对应关系, 这表明重建序列记录了可靠的区域尺度的温度信号。对重建温度序列的小波分析表明, 较为明显的有2–8年和10–16年的周期, 而这些周期可能与厄尔尼诺–南方涛动气候系统和太阳活动周期有一定的关系。

**关键词** 温度重建, 树木年轮, 川西地区, 卧龙国家级自然保护区

## Tree ring reconstruction of summer temperature variations over the past 159 years in Wolong National Natural Reserve, western Sichuan, China

LI Zong-Shan<sup>1</sup>, LIU Guo-Hua<sup>1\*</sup>, ZHANG Qi-Bing<sup>2</sup>, HU Chan-Juan<sup>1</sup>, LUO Shu-Zheng<sup>1</sup>, LIU Xing-Liang<sup>3</sup>, and HE Fei<sup>3</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; and <sup>3</sup>Institute of Ecology, Sichuan Forestry Research Academy, Chengdu 610081, China

### Abstract

**Aims** Improved understanding of tree growth responses to climate is needed to model and predict forest ecosystem responses to current and future climatic variability. Coniferous forests in Wolong National Natural Reserve occupy broad elevational ranges with varied geology and topography and thus have great potential for dendroclimatological studies. However, little is known about the growth-climate relationships in this region compared with the nearby Tibetan Plateau. Our objective was to determine the main climate responses in diameter growth and examine the regional climate variability within this ecological complex area.

**Methods** We used standardized dendroecological methods to study the effects of climatic variability on radial growth of a subalpine conifer, *Abies saxoniana*, which is the dominant and economically most important tree species in this region. We sampled 58 stands of *A. saxoniana* in a treeline site (3 450 m) and extracted increment cores for radial growth analyses. Several statistics were used to identify common patterns of interannual growth variability, and correlation and regression analyses were used to identify climatic factors associated with that variability.

**Important findings** The main limiting factor for tree growth was temperature in summer (June to August), followed by temperature in early spring (March), relative humidity from June to September of the current year and precipitation in October of the prior year. The summer (June to August) temperature reconstruction, spanning A.D. 1850–2008, was verified with independent data and accounted for 28.8% of the actual temperature variance during the period in common period (1955–2008). The most obvious characteristic of the reconstructed temperature was a significant warming trend after the 1940s. Before the 1940s, the climate of this region was consistent cold, with cold intervals in the 1850s–1870s and the 1890s–1930s. Because the low-frequency variation of the reconstruction agreed with previously published tree-ring proxies (ice cores of nearby glaciers), it appears that our reconstructed series was reliable and could aid in the evaluation of regional climate signal. Wavelet spectral analysis

收稿日期Received: 2010-01-11 接受日期Accepted: 2010-03-16

\* 通讯作者Author for correspondence (E-mail: ghliu@rcees.ac.cn)

indicated the existence of some decadal (10–16 years) and interannual (2–8 years) cycles, which probably are ascribed to solar variability and El Niño-Southern Oscillation (ENSO), respectively.

**Key words** temperature reconstruction, tree ring, western Sichuan, Wolong National Natural Reserve

全球气候变化对自然生态系统和社会经济系统已产生并将继续产生重大影响, 成为各国政府和科学界普遍关心的重大问题, 过去气候变化研究对于我们了解近代气候变化的自然背景和预测未来数十年气候变化的前景都具有重大的意义(IPCC, 2007)。树木年轮以其定年的精确性、时段的近代性, 以及样本分布广泛和环境指示意义明确等优势, 在过去全球变化研究中成为首选的代用资料之一(Fritts, 1976; Schweingruber, 1996), 并在揭示过去气候变化规律及机理研究中发挥了重要作用(Briffa *et al.*, 1998; Mann *et al.*, 1998; Cook *et al.*, 2004)。我国的年轮气候学研究是在20世纪80年代才逐步开展起来的(Wu *et al.*, 1987), 大部分研究主要集中在青藏高原(Yang *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2003; Bräuning & Mantwill, 2004; Shao *et al.*, 2005; Liang *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2009; 勾晓华等, 2004; 彭剑锋等, 2007)和新疆(袁玉江和李江风, 1999; 袁玉江等, 2005; 彭剑锋等, 2006; 崔宇等, 2007; 范敏杰等, 2008)、甘肃(邵雪梅等, 2003, 2007)等我国西北部干旱地区。

川西高原是青藏高原东南部的主要部分, 是青藏高原向我国第二级阶地过渡的区域, 介于青藏高原主体与四川盆地之间。川西高原主要的山脉自西向东依次为沙鲁里山、大雪山、邛崃山和岷山等, 其中, 大雪山主峰贡嘎山海拔7 556 m, 是四川海拔最高的山峰; 境内有长江上游的金沙江及其支流雅砻江、大渡河、岷江等切割出来的高山峡谷, 植被和自然景观亦呈垂直分布(四川植被协作组, 1980)。川西亚高山针叶林是我国西南林区的主体部分, 是长江上游的重要的生态屏障, 也是全球变化的敏感地带。大量的研究表明, 川西高原气温和降水的历史变化特点, 对了解全球变暖背景下青藏高原和四川省的区域气候变化及对全球变暖区域响应均具有重要意义(李川等, 2003)。由此可见, 川西地区应该是进行树木年轮气候学及其他相关研究的理想场所; 然而基于树木年轮资料探讨该地区的气候变化特征的研究与毗邻的青藏高原相比(Yang *et al.*, 2003; Bräuning & Mantwill, 2004), 还没有引起足够

的重视, 相关的研究较少。

川西地区早期的树轮气候学研究是由邵雪梅和范金梅(1999)在大雪山和沙鲁里山地区开展的, 主要利用4个地点的川西云杉(*Picea batfouriana*)的树轮资料, 重建了川西地区1650–1994年冬季平均最低气温距平序列, 并分析了其高频、低频和周期变化的特征。吴普等(2005)发现, 川西金川地区的高山松(*Pinus densata*)的树轮宽度主要与5月份降雨相关, 而树轮最大密度主要指示夏季(6–9月)温度, 并利用树轮密度序列重建了川西高原近百年的夏季温度波动序列。最近, 秦宁生等(2008)利用川西云杉的树轮资料, 重建了川西高原378年的初夏(6月份)最高气温, 探讨了川西高原的区域气候变化对全球气候变化的响应特征。由于采样地点的局限性, 川西高原现有的树轮气候学研究无法全面揭示该地区树木生长对于气候的响应特征和过去气候变化历史。本文利用川西卧龙地区岷江冷杉(*Abies faxoniana*)的树轮宽度数据, 重建了自1850年以来的夏季(6–8月)温度波动序列, 旨在为该地区气候的历史变迁研究提供高分辨资料, 并为进一步研究该区域亚高山森林对气候的响应提供科学基础。

## 1 研究区自然概况

卧龙自然保护区位于四川省汶川县西南部, 邛崃山系的东南坡, 岷江上游,  $102^{\circ}52' \text{--} 103^{\circ}24' \text{ E}$ ,  $30^{\circ}45' \text{--} 31^{\circ}25' \text{ N}$ , 东西横贯60 km, 南北跨越63 km, 总面积2 000  $\text{km}^2$ , 是我国最大的自然保护区之一(图1)。该地区气候属青藏高原气候区范围, 其特点是: 气候凉爽, 年平均气温 $4\text{--}6^{\circ}\text{C}$ ; 气温以1月份最低, 为 $-3.9^{\circ}\text{C}$ ; 以7月份最高, 为 $14.0^{\circ}\text{C}$ ; 有明显的干湿季节, 降雨主要集中于4月至10月, 占全年降水的60%以上, 年降水量710 mm左右, 降水天数长达200天以上; 相对湿度大, 年平均相对湿度为79%; 平均日照时数为1 293 h, 年蒸发量800 mm左右。从10月中旬到翌年4月为干季, 降雨少、日照长、蒸发大, 且空气干燥(气候数据主要来源于卧龙森林生态系统定位研究站, 海拔2 730 m,  $102^{\circ}58' \text{ E}$ ,  $30^{\circ}51' \text{ N}$ ) (郑绍伟等, 2006)。

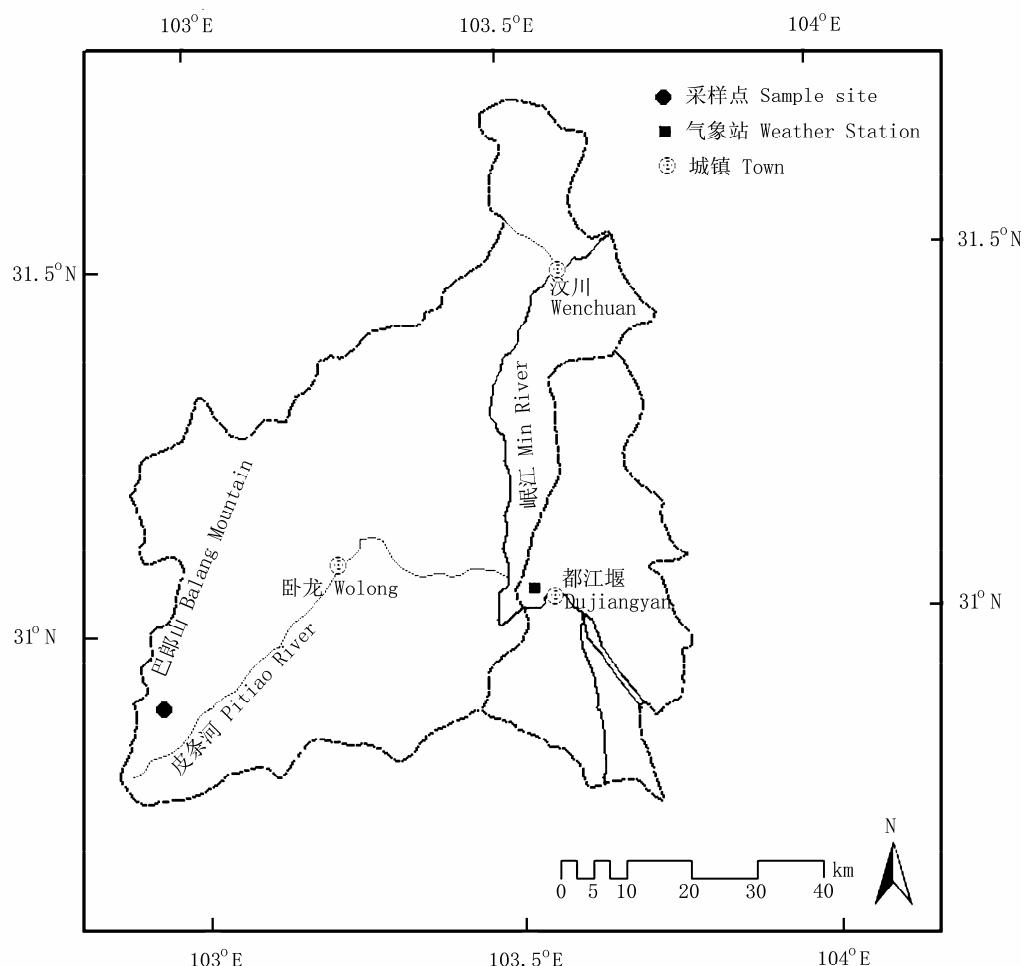


图1 卧龙国家级自然保护区树木年轮采样点和气象站分布图。

Fig. 1 Location map of tree-ring sample sites and meteorological station in the Wolong National Natural Reserve of western Sichuan, China.

岷江冷杉林分布于海拔2 700–3 600 m, 是卧龙分布最广的植被类型, 其覆盖面积和木材蓄积量约占森林面积的60%。岷江冷杉是乔木层的主要树种, 此外, 乔木层还有红桦(*Betula albo-sinensis*)、糙皮桦(*B. utilis*)和川滇长尾槭(*Acer caudatum* var. *pratti*)等树种, 灌木层主要有山光杜鹃(*Rhododendron oreodoxa*)、大叶金顶杜鹃(*R. faberi* subsp. *pratti*)、高山柳(*Salix dissa*)、桦叶荚蒾(*Viburnum betulifolium*)和红毛花楸(*Sorbus rufopilosa*)等, 灌丛盖度约为80%, 灌木高度平均为3.5 m, 灌丛密度较大, 林下草本不发达, 枯枝落叶层平均厚约30 mm (郑绍伟等, 2006; 黄金燕等, 2007)。

## 2 材料和方法

### 2.1 样品

本文所用岷江冷杉树轮资料是2009年9月在卧

龙地区巴郎山(邛崃山南段)东南坡采集的, 坡底是皮条河(岷江支流)河谷地带; 采样点海拔高度为3 450 m, 属于森林上线, 树木受人类活动影响较少。为获得较长的树木年轮样本, 在树轮样品采集点选择年龄较老的树木个体获取样本。样芯采集通常在胸高部位, 在垂直于山坡方向上用生长锥钻取树轮样本, 对于某些生长在悬崖及陡坡上或已局部枯朽的树木, 限于采样环境条件, 样芯的钻取高度和方向有所不同。取到的样芯放置在塑料样管内, 并在样管上用油性笔标注代码。本研究每棵树采集一根树轮样芯, 最终获得58根样芯。

样品预处理基本按照Stokes和Smiley (1968)的方法进行。首先将样品放置于平坦处晾干, 然后将其粘在特制的木槽中; 将粘牢的样芯依次用由粗到细(一般为280–600目)不同颗粒的砂纸进行打磨。

## 2.2 数据处理

样本经预处理后, 用骨架示意图进行交叉定年(Fritts, 1976), 然后使用LINTAB年轮分析仪对树木年轮宽度逐年进行测量, 该测量系统精度可达0.001 mm。利用COFECHA(Holmes, 1983)程序对定年和测量结果进行了检验, 保证定年与测量的准确性。对于那些效果较差、与主序列之间的相关系数达不到99%置信区的样芯予以剔除, 最终, 47根冷杉树芯用于年表的构建。

## 2.3 气象资料

卧龙森林生态系统邓生定位研究站距离采样点最近(约15 km), 但是该生态站建站时间较短, 只有最近几年的气象数据, 因而无法与年轮数据进行相关分析。鉴于此, 本研究的气象数据选取离采样地点最近的都江堰气象站(国家标准气象台站, 海拔698 m, 103°40' E, 31°01' N), 其位于采样点东部约60 km。气候资料气象数据由国家气象局(<http://cdc.cma.gov.cn/>)提供, 区间为1955–2008年, 经检验确认, 该站的气象数据可靠, 无明显的突变点和随机变化, 气象资料变化相对均一。由图2可知, 都江堰气象站不同月份的降雨和温度的波动特征与卧龙森林生态系统定位研究站的非常一致, 所以可以用其代表当地自然气候的年际变化趋势。

考虑到前一年气候状况对当年树木生长的影响(Fritts, 1976; Schweingruber, 1996), 所用气候资料的时间跨度为前一年7月到当年9月, 气候要素包括月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温、月降雨量和月平均相对湿度。

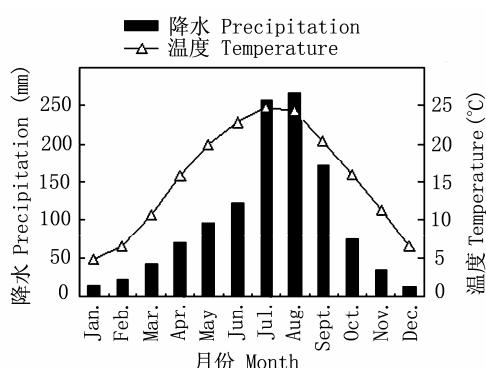


图2 川西地区都江堰气象站月平均温度和降水变化(1955–2008年)

Fig. 2 Variations of mean monthly temperature (°C) and precipitation (mm) of Dujiangyan meteorological station in western Sichuan from 1955 to 2008.

## 3 研究结果

### 3.1 年表的建立

经过交叉定年的年轮序列, 用ARSTAN程序(Cook & Kairiukstis, 1990; Cook *et al.*, 1994)进行去趋势和标准化, 这一过程消除了树木生长中与年龄增长相关联的生长趋势及部分树木之间的非一致性扰动, 排除了其中的非气候信号。首先对每个年轮宽度序列进行负指数曲线拟合, 以去除与树木年龄有关的生长趋势; 如果不成功, 则用任意斜率的线性回归进行直线拟合, 并以取树轮宽序列和与其对应的生长趋势拟合曲线的比值, 对所得到的去趋势进行双权韧性平均(biweight robust mean), 合成了平均值为1、无量纲的树轮宽度年表(图3)。ARSTAN程序除了可以建立常规的标准年表(STD)外, 还可建立差值年表(RES)和自回归年表(ARS)(Fritts, 1976), 对3种年表若干统计参数进行了对比后, 最后选择树轮标准年表代表本研究区域树木年际径向生长。考虑到年表的可信度随着复本量的减少而下降, 本研究年表的起始年份(1850年)的最低复本量为5根样芯。构建该年表样芯的平均长度为116年(61年–205年), 其中, 超过百年的样芯达30根, 所以该年表可较可靠地记录卧龙地区过去159年(1850–2008年)的树木年际径向生长的波动历史。

年表的统计量特征可以反映树木生长的一些基本特征以及树轮年表所含不同频率信息量的多少(表1)。结果表明, 各树种年轮样本间具有较好的相关性(样芯间相关系数  $R_{bar} = 0.387, p < 0.01$ ), 表明不同样芯之间的轮宽变化有很好的一致性。各年表的一阶自相关系数为0.776, 说明树木前一年的生长状况对当年生长有一定的影响(Fritts, 1976)。年表的平均敏感度较低, 仅为0.123, 这说明了树轮资料具有较弱的高频波动信号。年表的信噪比和第一主成分解释方差量数值分别为6.931和20.94%, 均达到了较高的水平; 年表具有较高的样本群体表达信号, 数值为0.87, 这说明了本调查采集样本量所含的信号是能代表总体特征的(Wigley *et al.*, 1984)。以上年表各种统计特征表明了样本之间的树轮宽度变化有很好的一致性, 记录了可靠区域气候信息, 所以本次调查所用的树轮资料适于进行年轮气候学分析。

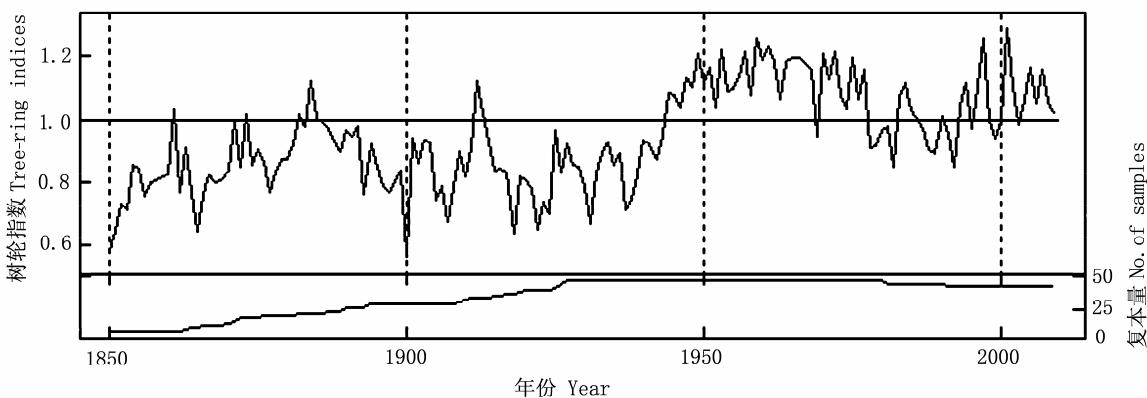


图3 卧龙国家级自然保护区岷江冷杉的标准年表。

Fig. 3 The standard tree-ring chronologies of *Abies faxoniana* in Wolong National Natural Reserve of western Sichuan, China.

表1 卧龙国家级自然保护区树轮采样点概况、标准年表主要特征参数及共同区间分析结果

**Table 1** Site information, chronology statistics and results of common interval span analysis of standard tree-ring chronology from Wolong National Natural Reserve, western Sichuan of China

经度 Longitude	102°59' E
纬度 Latitude	30°53' N
海拔 Altitude (m)	3 450
采样植株数量 No. of sample trees	47
样芯数量 No. of cores	47
年表长度 Chronology length	A.D. 1850–2008
平均宽度 Mean tree width (mm)	0.752
标准差 SD	0.287
平均敏感度 Mean sensitivity	0.123
一阶自相关 Autocorrelation order 1	0.776
共同区间 Common interval time span	A.D. 1930–2008
样芯间相关系数	0.387
Rbar (Mean inter-series correlation)	
信噪比 Signal-to-noise ratio	6.931
样本群体表达信号 Express population signal	0.874
第一主成分所占方差量 Variance in first eigenvector	20.94%

### 3.2 树木生长对气候要素的响应

树木生长与气候要素变化的关系是利用树木年轮进行气候研究的基础,主要是通过相关分析和响应函数分析的方法进行的,分析过程是由软件DendroClim2002实现的(Biondi & Waikul, 2004)。研究时段为有器测资料以来的年代(1955–2008年)。分析结果表明,树木径向生长对温度的响应特征基本

一致,规律性最为明显(图4)。其中,夏季7月份的平均气温、最高气温和最低气温与年表均存在着明显的正相关关系,除7月份最高气温与年表的响应函数系数( $r = 0.22$ )略低外,其他相关( $r = 0.33$ – $0.40$ )和响应函数分析( $r = 0.28$ )均通过了95%的置信区间;夏季6月、8月的平均气温、最高气温和最低气温与年表的相关系数虽然没有达到显著性水平,但是体现了一致的正相关关系。另外一个明显特征是,春季3月份的平均气温、最高气温和最低气温均对树木径向生长有着显著的正影响作用,相关( $r = 0.33$ )和响应函数结果( $r = 0.26$ – $0.36$ )均达到了显著性水平。从图4还可以看出,冬季的温度(特别是11月和12月)的平均气温、最高气温和最低气温与树轮数据存在一致的负相关关系,但相关系数未达到显著性水平。

与树木径向生长对温度的响应特征相比,年表与降雨和相对湿度的关系明显较弱,树木径向生长仅与去年10月份的降雨存在明显的正相关关系,相关( $r = 0.34$ )和响应分析( $r = 0.28$ )均达到了显著性水平,而与其他月份的降雨没有明显的关系;从年表与相对湿度的关系来看,树木的径向生长主要是与6–9月份的相对湿度存在一定的负相关关系,但是相关和响应分析均未达到显著性水平。

从相关和响应函数分析结果看,研究区域树木的径向生长主要受温度的制约,而与降雨和相对湿度的关系明显较弱。树木生长与3月份的温度均有显著的正相关关系,但是春季其他月份的温度与树轮数据没有较好的相关性;而夏季温度(6–8月份)

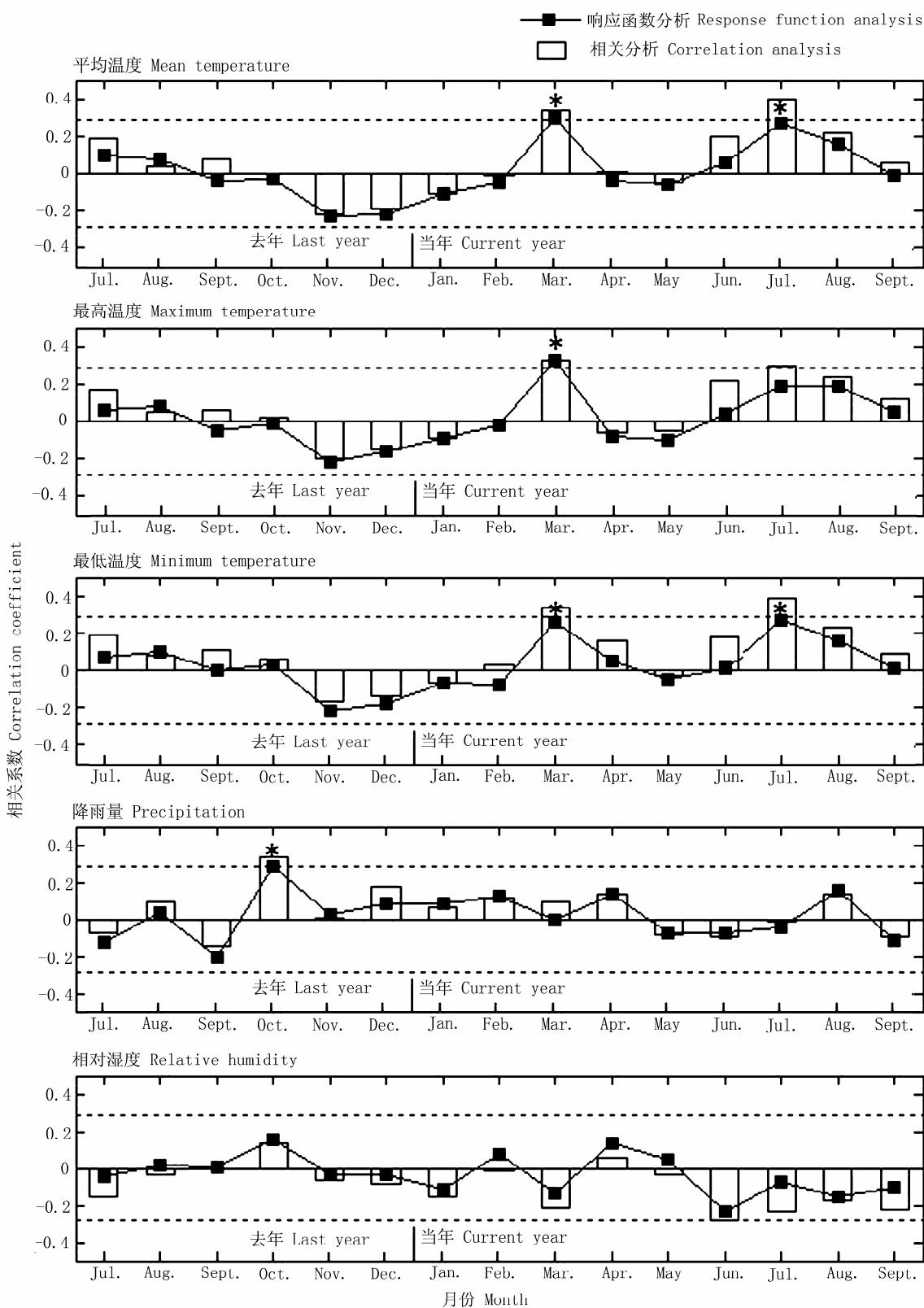


图4 卧龙国家级自然保护区树轮年表与气候要素(平均温度、最高温度、最低温度、降雨和相对湿度)的相关和响应函数分析。柱形图表示相关分析结果, 点线图表示响应分析结果, 虚线表示相关分析显著性水平线( $p < 0.05$ ), \*表示响应函数分析显著月份( $p < 0.05$ )。

**Fig. 4** Correlation and response function analysis between climate (mean, maximum and minimum temperature, precipitation and relative humidity) and tree-ring chronology of Wolong National Natural Reserve, western Sichuan of China. Bar diagrams are the results of correlation analysis and line graph is the results of response function analysis. The dashed lines represent significant effects ( $p < 0.05$ ) for correlation analysis, and the asterisks above columns represent significant effects ( $p < 0.05$ ) for response function analysis.

对于树木生长均有一致的正相关关系, 考虑到树木生长对于夏季平均气温、最高气温和最低气温响应关系的相似性以及重建要素的意义和代表性, 本文最终选定夏季(6—8月)平均气温作为气候指标用于气候重建。

### 3.3 气候重建构建及检验

将树轮年表定量地转换成过去的气候要素, 需要进行校准分析, 即建立转换方程。采用回归分析的方法来建立转换方程。利用年表指数组合与夏季温度建立的线性回归方程(图5)如下:

$$y = 21.84 + 2.14x, \\ (r = 0.536, R^2 = 28.8\%, R^2_{adj} = 27.3\%, p < 0.01)$$

式中,  $y$ 为夏季温度(6—8月),  $x$ 为树轮年表的指数组合。在1955—2008年校准时段, 此方程非常显著。夏季温度的方差解释量为28.8%, 调整后方差解释量为27.3%。

回归方程建立之后, 必须对其进行稳定性检验, 由于校准长度仅为54年(1955—2008年), 难以采用独立检验的方法, 故采用年轮研究中常用的留一法(leave-one-out)对回归方程的可靠性进行检验(Fritts, 1976)。对于重建的校准期(1955—2008年), 重建方程的相关系数为0.493, 方差解释量是24.3%, 调整后方差解释量为24.1%, 均达到了99%的统计学显著水平(表2)。从重建夏季温度序列与器测数据在最近50年来的波动趋势看, 重建序列较好地拟合了器测数据的波动规律(图6A)。对于重建方程的符号检验和乘积平均值检验也通过了显著性检验, 缩减误差和效率系数的数值均较高, 分别为0.298和0.284, 一般认为, 缩减误差和效率系数为正值时, 所监测的数据是可靠的; 重建模型的Durbin-Watson检验数值为1.645 ( $1.645 \approx 2$ ), 表明重建回归模型中的误差项是独立的, 结论是可信的。回归模型的估计和假设所作出的重建模型的各种检验参数均通

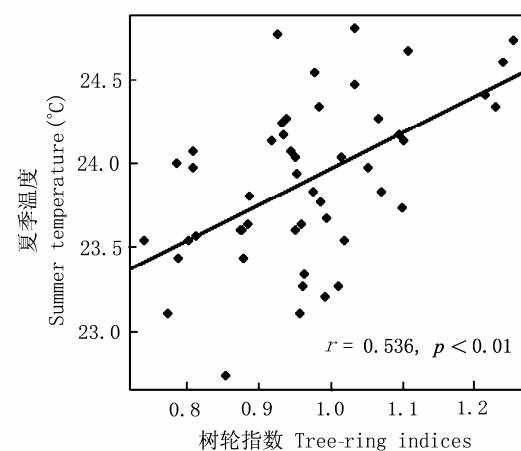


图5 树轮指数与夏季(6—8月)温度的散点图(1955—2008年)。

Fig. 5 Scatter plot of summer (June to August) temperature and tree-ring indices with linear relationship highlighted during the period of 1955–2008.

过了统计检验, 说明该模型是较为稳定和可靠的, 可用于该地区夏季温度(6—8月)的历史重建。

### 2.4 重建夏季温度序列的波动特征

依据转换方程, 重建了川西卧龙地区夏季(6—8月)温度过去159年(1850—2008年)来的变化(图6B)。从图6可以看出, 该地区温度变化还是比较明显的。重建温度序列显示在20世纪40年代以前, 气候主要是以寒冷为主, 在过去159年最为明显的寒冷期(1850—1870年和1890—1930年)均分布于这个时段。

该时段也是极端寒冷年份频繁发生的时期, 如1850—1853年、1865年、1900年、1905年、1907年、1918年、1922—1924年、1931年和1937—1938年; 在这个时段仅有个别年份的温度处于平均数值(23.85 °C)以上, 主要分布在1861年、1871—1873年、1882—1887年、1890—1892年和1912—1913年。同时, 重建温度序列显示: 卧龙地区在20世纪40年代以后, 气候明显趋于变暖, 其中1943—1977年是过去150多年来最为温暖的时期; 过去20个最为温暖的

表2 卧龙国家级自然保护区气候重建模型的留一法统计检验

Table 2 Leave-one-out cross-validation statistics of climate-growth model for climate reconstruction in Wolong National Natural Reserve of western Sichuan, China.

	$r$	$R^2$	$R^2_{adj}$	$RE$	$CE$	$ST$	$PMT$	$DW$
校准 Calibration	0.536	0.287*	0.273*	—	—	—	—	—
验证 Verification	0.493	0.243*	0.227*	0.241	0.223	38+/17-*	3.841*	1.645

$CE$ , 效率系数;  $DW$ , Durbin-Watson检验;  $PMT$ , 乘积平均值检验;  $r$ , 相关系数;  $R^2$ , 方差解释量;  $R^2_{adj}$ , 调整方差解释量;  $RE$ , 缩减误差;  $ST$ , 符号检验。\*,  $p < 0.05$ 。

$CE$ , coefficient of efficiency;  $DW$ , Durbin-Watson test;  $PMT$ , product mean test;  $r$ , correlation coefficient;  $R^2$ , explained variance,  $R^2_{adj}$ , adjustment explained variance;  $RE$ , reduction of error statistic;  $ST$ , sign test. \*,  $p < 0.05$ .

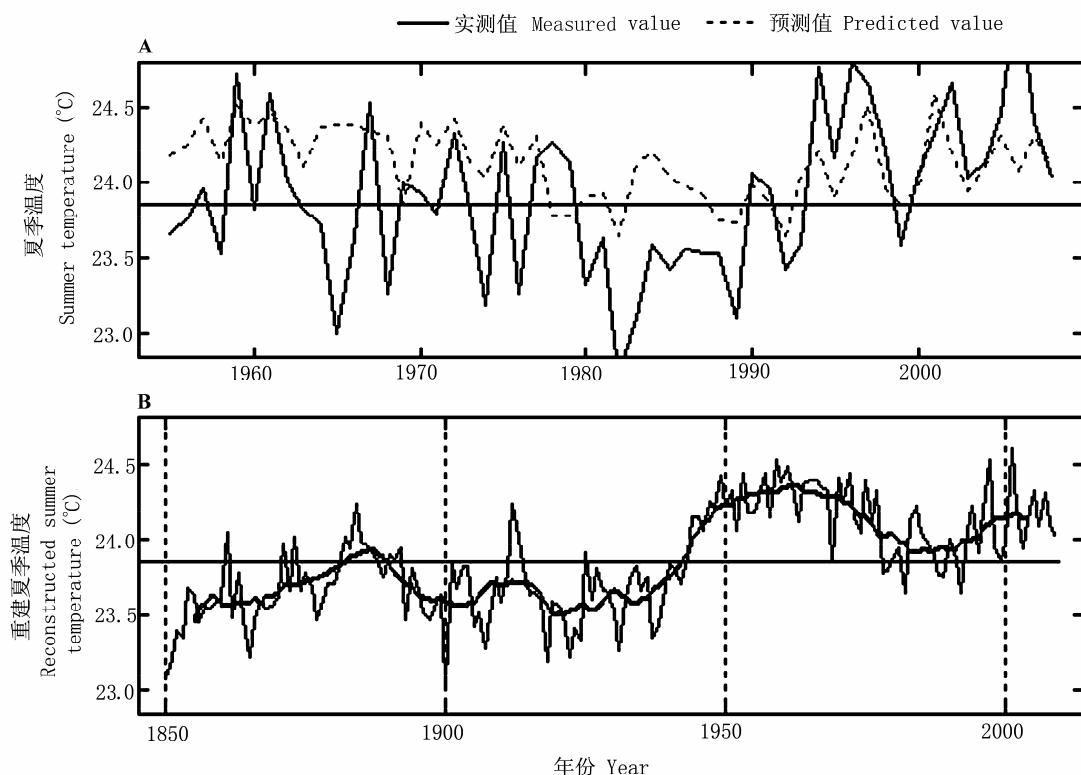


图6 卧龙国家级自然保护区的气候重建。A, 重建与实测夏季温度序列比较(1955–2008年)。B, 夏季温度重建序列(1850–2008年), 黑色粗线是11年滑动平均。

**Fig. 6** Climate reconstruction in Wolong National Natural Reserve of western Sichuan, China. **A**, The comparison of actual and reconstructed summer temperature from 1955 to 2008. **B**, Tree-ring reconstruction of summer temperature, plotted annually from 1850 to 2008, along with a smoothed 11-year moving average.

年份中有17年都分布在这个温暖时期,依次为1949年、1951年、1953年、1956–1957年、1959–1962年、1964–1968年、1970年、1972年、1975年和1977年。该地区气候在20世纪70年代末和90年代初又出现一个相对寒冷的时期,其中寒冷年份出现在1979年、1982年、1988–1989年和1992年。在20世纪90年代末至今,卧龙地区气温又呈现出较为明显的升温趋势,其中2001年和1997年均为过去一个多世纪以来最温暖的年份;然而这个时期温度的年际波动幅度也很大,温度相对较低的年份有1995年、1998–2000年及2003年。

### 3 讨论

#### 3.1 树木生长与气候要素关系的解释

通常认为,森林上限树木生长主要受夏季低温的控制(Kömer & Paulsen, 2004),相关分析和响应函数均表明,卧龙地区的树木生长对于夏季(6–8月)温度的响应要比其他因子的响应显著,这进一步证

明了夏季温度对于林线位置树木生长的控制性影响。夏季温度对于树木生长的限制性作用在川西及其附近地区均得到了验证,如川西高原的大雪山和沙鲁里山的川西云杉(*Picea balfouriana*)的树木年轮材料被发现可用来指示初夏(6月份)的平均最高气温变化(邵雪梅和范金梅, 1999; 秦宁生等, 2008);吴普等(2005)发现,川西小金地区的高山松(*Pinus densata*)的树木生长主要受夏季(6–9)温度制约,并采用高山松的最大密度序列重建川西高原近百年夏季温度;Fan等(2008)则利用滇西北横断山区麦吊云杉(*Picea brachytyla*)的树轮材料重建了该地区过去250年来的温暖季节(4–9月)的温度波动。夏季温度还被证明对于青海长江源地区(Liang et al., 2008)和藏东南(Bräuning & Mantwill, 2004)的树木生长具有显著性的影响作用。夏季处于树木生长最为旺盛的时段,较高的气温有利于光合作用,生产出充足的光合产物用于树木的生长;该地区夏季夜晚气温回落较快,昼夜温差很大,降低了呼吸消耗,造成

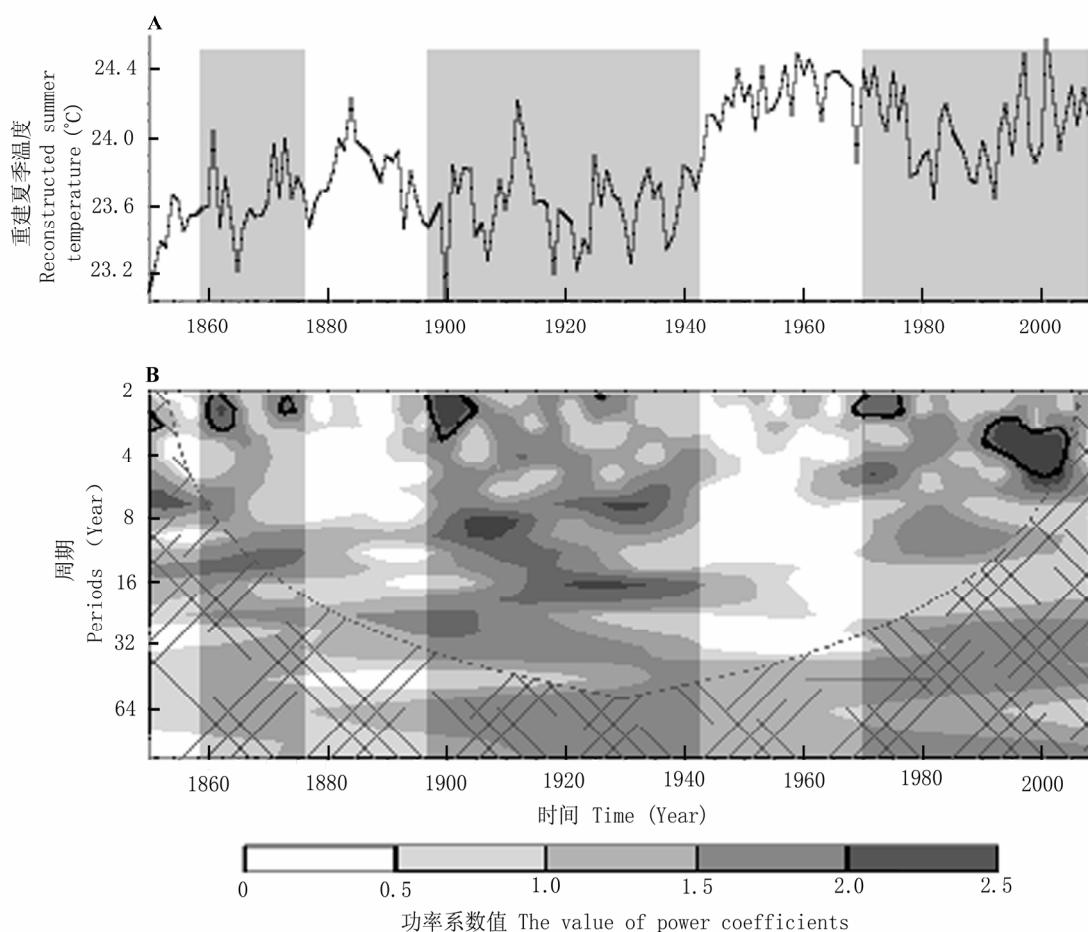


图7 卧龙国家级自然保护区气候重建序列的波谱分析。A, 夏季温度重建序列。B, 重建序列小波权重波谱。灰色区域分别代表75%、50%、25%和5%的波谱权重；黑色固线代表红噪音5%的显著水平。

**Fig. 7** Wavelet analysis of the reconstructed series in Wolong National Natural Reserve of western Sichuan, China. **A**, The reconstructed series of summer temperature. **B**, The wavelet power spectrum for the reconstructed series. Contours enclosing the gray regions are 75%, 50%, 25%, and 25% of the wavelet power, respectively. Black contour is the 5% significant level, using a red-noise (autoregressive lag 1) background spectrum.

营养物质净积累的增加，从而促进了树木的生长(Tranquillini, 1979)。与之相反，夏季低温不仅是林线树木畸形生长的决定性因子，而且还缩短了生长季节的长度，限制了植物的水分吸收、树木干物质增长以及林线处树木的发芽力(王晓春等, 2005)，这些都是树木出现窄轮的重要原因。而年表与6—9月份相对湿度负相关的关系也间接地反映出夏季温度对于树木生长的限制性作用，6—9月份是卧龙地区最为湿润的时期，阴雨天气持续不断，而且海拔3 000 m以上的山区出现大雾的频率很高；这个时期浓厚的云层会减少太阳光照强度，从而使得夏季温度偏低，树木可利用的光合有效辐射也随之下降，进而限制了树木的径向生长(Kömer, 1999；刘鸿雁等, 2002)。

卧龙地区的树木生长在很大程度上受到初春3月份温度的影响。总体上讲，由于该地区树木的活跃生长期大致为每年的4—9月份，生长季前期温度的高低将直接影响树木生长期开始的早晚；早春温度偏高可促进形成层活动提早和加速阴坡的积雪融化，从而相应地延长植物的生长期，有利于树木的生长(李培基, 1996；王婷等, 2003)。另外，树木径向生长还与冬季温度(11月到第二年1月)存在一定的负相关关系，这也具有一定的生理意义。本研究的采样地区位于冷杉林线位置，海拔较高(在3 000 m以上)，冬季漫长且温度偏低，当冬季出现罕见的寒冷时期时，会使植物叶细胞内的原生质脱水，还可能因土壤冻结而导致树木根系冻死，造成来年光合作用减弱，且使树木生长期缩短，从而形成窄年

轮(Rolland, 1993; 袁玉江和李江风, 1999; Pederson *et al.*, 2004)。在一定的高度范围内, 随海拔的升高降水有逐步增加的趋势, 降水对树木生长的限制作用也逐步减弱; 在森林上限, 通常认为降水对树木生长的影响是不显著的(Fritts, 1976; Kömer & Paulsen, 2004)。本研究中的树轮宽度指数序列中所包含的降雨信号也较弱, 仅体现为与去年秋季10月份的降雨有着正相关关系。去年秋季树木各组织器官的生长基本停止, 但仍能进行一定的光合作用, 此时湿润的条件有利于积累更多的光合产物, 为来年春季形成层活动提供较多的养分; 另一方面, 秋季充沛的降水可以提高土壤含水量, 为树木下一年的生长提供必要的水分(Thomsen, 2001; Cleaveland *et al.*, 2003)。

### 3.2 重建序列的历史波动特征

基于树轮资料的重建序列反映了川西卧龙地区过去159年的夏季温度波动历史, 该重建序列在年际和数十年尺度上均具有较好的波动趋势(图6B)。重建序列一个最为显著的特征是自20世纪40年代以来的显著升温过程, 虽然卧龙地区的温度波动在20世纪70年代之后明显加剧, 甚至在20世纪80年代和90年代初形成了一个温度相对偏低的时期, 之后的温度又趋于明显的上升, 但是从过去百年尺度上看, 20世纪中后期的升温还是非常显著的。这与之前近100年的温度偏低时期形成了鲜明的对照, 可能是全球变暖趋势在该地区的具体体现。全球气候变暖是20世纪末在全球环境变化方面的最为重要的事件。对于全球变化事件响应敏感的青藏高原及其附近地区在近代的升温过程也是很明显的(李培基, 1996); 基于青藏高原及其附近山区70多个气象站的数据, Liu和Chen (2000)发现, 在1955–1996年这个时间段内, 该地区的夏季和冬季温度平均每10年上升0.09 °C 和0.32 °C。被用来指示青藏高原地区过去千年温度变化的冰芯氧同位素序列也显示在大约20世纪40年代以后, 气候快速升温至今, 被认为是过去千年来最为温暖的时期(姚檀栋等, 2006); 青藏高原东南部的季风温冰川(玉龙雪山1号冰川、梅里雪山明永冰川、贡嘎山海螺沟冰川以及藏东南阿扎冰川)的进退资料表明, 在20世纪中后期这些冰川均出现了明显的后退, 这被认为是近代全球升温所导致的(何元庆等, 2003)。由此可见, 卧龙地区20世纪中后期的显著变暖趋势与青藏高

原地区的气象、冰芯以及冰川进退数据具有很好的对应关系, 这说明了本研究中的树木年轮材料所指示的温度信号具有较好的空间代表性。

重建序列显示, 过去最为明显的寒冷时期发生在19世纪90年代和20世纪初期(1890–1942年), 持续时间长达53年。这个寒冷时期在附近地区的树轮资料中也有所体现, 如基于川西大雪山和沙鲁里山区年轮材料的夏季温度重建序列, 秦宁生等(2008)发现重建序列在1911–1940年存在一个显著的寒冷时期; 基于横断山区树轮资料的温度重建序列, Fan等(2008)也表明气候在20世纪初期存在两个寒冷时期(1910–1920年和1930–1940年), 但是与本序列相比, 寒冷强度和持续时间都明显较弱。另外, 与卧龙地区邻近的贡嘎山海螺沟冰川在1910–1930年表现为持续的推进(何元庆等, 2003), 这表明当时气候正处于一个明显的寒冷时期, 而这也是与卧龙年表所指示的温度信号基本吻合的。重建序列还表明, 当地气候在1850–1870年也经历了一次较为明显的寒冷时期, 这个寒冷时期在川西高原和横断山区的树轮资料中也均有相应的体现(邵雪梅和范金梅, 1999; Fan *et al.*, 2008)。

### 3.3 重建序列的周期特征

小波分析用于确定重建气候的周期性及周期随时间的变化。用于本次分析的小波是Morlet 6, 波谱权重检验用红噪音过程, 显著水平为5% (Torrence & Compo, 1998), 用网上公开的小波分析程序(<http://ion.researchsystems.com>)完成。小波分析结果表明重建序列最明显的为2–8年的周期(图7B), 处于公认的厄尔尼诺-南方涛动气候系统(Niño/Southern Oscillation: ENSO)波动周期(2–8年)范围内(Ropelewski & Halpert, 1987; McPhaden *et al.*, 2006)。已有研究表明, ENSO系统中的厄尔尼诺(El Niño)和拉尼娜(La Niña)事件对于四川的气候特征、农业活动, 甚至社会经济都有一定的影响(肖天贵和谌芸, 1994), 所以序列的2–8年的周期可能是ENSO对该地区树木生长周期性影响的体现。重建序列的10–16年周期则很有可能是太阳黑子11年左右的活动周期的体现, 太阳活动强弱的长周期变化被普遍认为对于大尺度气候系统有显著影响(Rind, 2002)。

小波分析结果还显示, 上述的周期信号在时间尺度上是不稳定的, 而是主要集中在某些时段上。

2–8年的周期信号主要集中在1860–1870年、1900–1930年和1970年至今，而10–16年的周期信号主要集中在1900–1930年(图7中的阴影部分)。不难发现，周期信号较强的时段都是年际温度波动最明显的时段，也是较为寒冷的时期，这可能是由于ENSO事件和太阳活动较为强烈的缘故；而周期信号不明显的1880–1890年和1940–1970年，温度的年际波动平缓，这也是相对温暖的时期，ENSO气候系统和太阳活动可能在这些时期内维持着相对稳定的状态。

## 5 结论

四川卧龙地区林线位置的岷江冷杉的树轮生长对气候变化的响应比较明显，影响树木径向生长的主要限制因子是夏季(6–8月份)温度。另外，春季3月份和冬季(11月到第二年1月)的温度以及秋季10月份的降雨对树木生长也有一定的限制性影响。通过夏季温度重建序列可以看出，该地区在过去159年来的温度波动比较明显。在1940年以前，气候以寒冷为主，主要的寒冷时期有1850–1870年和1890–1930年；在1940年以后，气候明显趋于变暖，其中1943–1977年是过去150多年来最为温暖的时期。重建序列的小波分析表明，较为明显的有2–8年和10–16年的周期，而这可能与目前公认的ENSO气候系统和太阳活动周期有一定的关系，这说明该地区的温度波动受全球大尺度气候变化的一定影响。

林线作为高山森林垂直分布的上界，处于高寒气候胁迫的临界状态，因其所处的特殊的地理位置，成为植被与气候变化关系研究的理想场所(Kömer & Paulsen, 2004)。最近，研究温室气体浓度增加及其所导致的全球性气候变暖对林线生态系统的影响是当前生态学研究的热点之一(Lloyd & Graumlich, 1997; Villalba *et al.*, 1997)。本研究中的重建夏季温度也表明，卧龙地区林线位置的树木生长速度在20世纪下半叶有明显上升的趋势，这很有可能是近代气候变暖趋势在树木年轮资料中的具体体现，而类似的现象已被世界广大林线地区的树轮资料所证实(Briffa *et al.*, 2004; Büntgen *et al.*, 2006; Mann *et al.*, 2008)。另外，高山林线的海拔高度随时间变化的研究也表明，20世纪以来高山林线的海拔高度均有不同程度的升高(Graumlich, 1991;

Ogden *et al.*, 1997; Kullman, 2001)，上述发现从不同的方面说明20世纪的气候确实异常温暖。需要特别指出的是，最近D'Arrigo (2008)和Büntgen等(2008)指出，北半球高纬度地区对于夏季温度响应敏感的树木年轮密度序列在20世纪中后期出现了一个不同寻常的生长下降时期，表现为在近代树木生长对于温度响应的失敏效应(divergence problem)，并指出近代人为活动加剧可能是导致这种现象发生的主要原因。在川西大雪山和沙鲁里山(吴普等, 2005; 秦宁生等, 2008)、滇西北的横断山区(Fan *et al.*, 2008)和青藏高原的东南部(Bräuning & Mantwill, 2004)，基于树轮资料的温度重建序列在20世纪不但没有升温趋势，反而在20世纪60–80年代出现了一个明显的温度偏低的时期，而20世纪60–80年代温度相对偏低的特点在本研究中的温度重建序列中也有所体现，这可能意味着，在高纬度地区发现的树木生长对于温度的失敏响应在上述地区也有所体现。然而，只有在川西以及相关地区更加广泛的范围内开展树木年轮气候学研究之后，才能更加科学地认识这些地区的树木生长对于近代气候变暖响应的空间异质性特征。

**致谢** 国家自然科学基金(40871248)资助项目。野外调查和取样中得到四川省林科院邓生亚高山暗针叶林生态系统定位研究站的大力支持，中国科学院植物研究所邱红岩老师和刘彩云老师对于年轮样本处理和分析给予了极大的支持，中国科学院植物研究所张金龙博士、刘国芳博士在数据分析方法和标本鉴定上给予了热情帮助，一并表示衷心的感谢。

## 参考文献

- Biondi F, Waikul K (2004). DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers and Geosciences*, 30, 303–311.
- Bräuning A, Mantwill B (2004). Summer temperature and summer monsoon history on the Tibetan plateau during the last 400 years recorded by tree rings. *Geophysical Research Letters*, 31, L24205, doi:24210.21029/22004-GL020793.
- Briffa K, Osborn T, Schweingruber F (2004). Large-scale temperature inferences from tree rings: a review. *Global and Planetary Change*, 40, 11–26.
- Briffa KR, Schweingruber FH, Jones PD, Osborn TJ, Shiyatov SG, Vaganov EA (1998). Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes.

- Nature*, 391, 678–682.
- Büntgen U, Frank D, Wilson R, Carrer M, Urbinati C (2008). Testing for tree-ring divergence in the European Alps. *Global Change Biology*, 14, 2443–2453.
- Büntgen U, Frank DC, Nievergelt D, Esper J (2006). Summer temperature variations in the European Alps, A.D. 755–2004. *Journal of Climate*, 19, 5606–5623.
- Cleaveland MK, Stahle DW, Therrell MD, Villanueva-Diaz J, Burns BT (2003). Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change*, 59, 369–388.
- Collaborating Group for Vegetation of Sichuan (四川植被协作组) (1980). *Vegetation of Sichuan* (四川植被). Sichuan People's Press, Chengdu. (in Chinese)
- Cook ER, Briffa KR, Jones PD (1994). Spatial regression methods in dendroclimatology: a review and comparison of two techniques. *International Journal of Climatology*, 14, 379–402.
- Cook ER, Kairiukstis LA (1990) *Methods of Dendrochronology*. Springer, New York.
- Cook ER, Woodhouse CA, Eakin CM, Eakin CM (2004). Long-term aridity changes in the western United States. *Science*, 306, 1015–1018.
- Cui Y (崔宇), Yuan YJ (袁玉江), Jin HL (金海龙), Yu SL (喻树龙), Li J (李娟), Zhang TW (张同文) (2007). Reconstruction and analysis of 467-year spring precipitation series in the Urumqi River Head. *Arid Land Geography* (干旱区研究), 30, 496–500. (in Chinese with English abstract)
- D'Arrigo R (2008). On the 'Divergence Problem' in northern forests: a review of the tree-ring evidence and possible causes. *Global and Planetary Change*, 60, 289–305.
- Fan MJ (范敏杰), Yuan YJ (袁玉江), Wei WS (魏文寿), Yu SL (喻树龙) (2008). Interpolation and analysis of mean summer maximum temperature in Yili prefecture in the west Tianshan Mountains, China. *Arid Land Geography* (干旱区研究), 25, 75–81. (in Chinese with English abstract)
- Fan ZX, Bräuning A, Bao Y, Cao KF (2008). Tree ring density-based summer temperature reconstruction for the central Hengduan Mountains in southern China. *Global and Planetary Change*, 65, 1–11.
- Fritts HC (1976). *Tree Rings and Climate*. Academic Press, New York.
- Gou XH (勾晓华), Chen FH (陈发虎), Yang MX (杨梅学), Peng JF (彭剑锋), Qiang WY (强维亚), Chen T (陈拓) (2004). Analysis of the tree-ring width chronology of Qilian Mountains at different elevation. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 24, 172–176. (in Chinese with English abstract)
- Graumlich LJ (1991). Subalpine tree growth, climate and increasing CO<sub>2</sub>: an assessment of recent growth trends. *Ecology*, 72, 1–11.
- He YQ (何元庆), Zhang ZL (张忠林), Yao TD (姚檀栋), Chen T (陈拓), Pang HX (庞洪喜), Zhang D (章典) (2003). Modern changes of the climate and glaciers in China's monsoonal temperature-glacier region. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 58, 550–558. (in Chinese with English abstract)
- Holmes RL (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 69–78.
- Huang JY (黄金燕), Zhou SQ (周世强), Tan YC (谭迎春), Zhou XP (周小平), Wang PY (王鹏彦), Zhang HM (张和民) (2007). Study on the species diversity of plant community in the Giant Panda habitat of Wolong Natural Reserve: species richness, species diversity and evenness. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 43, 73–78. (in Chinese with English abstract)
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation & Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kömer C (1999). *Alpine Plant Life: Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems*. Springer, Berlin.
- Kömer C, Paulsen J (2004). A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography*, 31, 713–732.
- Kullman L (2001). 20th century climate warming and tree-limit rise in the southern Scandes of Sweden. *Ambio*, 30, 72–80.
- Li C (李川), Chen J (陈静), Zhu YJ (朱燕君) (2003). Preliminary research on climatic change of west Sichuan Plateau in recent fifty years. *Plateau Meteorology* (高原气象), 22, 138–144. (in Chinese with English abstract)
- Li PJ (李培基) (1996). Response of Tibetan snow cover to global warming. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 51, 260–265. (in Chinese with English abstract)
- Liang EY, Shao XM, Qin NS (2008). Tree-ring based summer temperature reconstruction for the source region of the Yangtze River on the Tibetan Plateau. *Global and Planetary Change*, 61, 313–320.
- Liu HY (刘鸿雁), Gu HT (谷洪涛), Tang ZY (唐志尧), Dai JH (戴君虎), Cui HT (崔海亭) (2002). Tree photosynthesis on alpine timberline and its relationships to environmental factors in the eastern part of temperate China. *Journal of Mountain Science* (山地学报), 20, 32–36. (in Chinese with English abstract)
- Liu XD, Chen BD (2000). Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades. *International Journal of Climatology*, 20, 1729–1742.
- Liu Y, An ZS, Linderholm HW, Chen DL, Song HM, Cai QF, Sun JY, Tian H (2009). Annual temperatures during the last 2485 years in the mid-eastern Tibetan Plateau inferred

- from tree rings. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 52, 348–359.
- Lloyd A, Graumlich U (1997). Holocene dynamics of treeline forests in the Sierra Nevada. *Ecology*, 78, 1199–1210.
- Mann ME, Bradley RS, Hughes MK (1998). Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature*, 392, 779–787.
- Mann ME, Zhang ZH, Hughes MK, Bradley RS, Miller SK, Rutherford S, Ni FB (2008). Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105, 13252–13257.
- McPhaden MJ, Zebiak SE, Glantz MH (2006). ENSO as an integrating concept in Earth science. *Science*, 314, 1740–1745.
- Ogden J, Horrocks M, Palmer JG, Fordham RA (1997). Structure and composition of the subalpine forest on Mount Hauhungatahi, North Island, New Zealand, during the Holocene. *Holocene*, 7, 13–23.
- Pederson N, Cook ER, Jacoby GC, Peteet DM, Griffin KL (2004). The influence of winter temperatures on the annual radial growth of six northern-range-margin tree species. *Dendrochronologia*, 22, 7–29.
- Peng JF (彭剑锋), Gou XH (勾晓华), Chen FH (陈发虎), Li JB (李金豹), Liu PX (刘普幸), Tian QH (田沁花), Zhang Y (张永), Zhang YX (张永香) (2006). The responses of growth ring width variations of *Larix sibirica* Ledb to climatic change in eastern Tianshan Mountains. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 26, 2723–2731. (in Chinese with English abstract)
- Peng JF (彭剑锋), Gou XH (勾晓华), Chen FH (陈发虎), Liu PX (刘普幸), Zhang Y (张永), Fang KY (方可艳) (2007). Characteristics of ring-width chronologies of *Picea crassifolia* and their responses to climate at different elevations in the Anyemaqen Mountains. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 27, 3268–3276. (in Chinese with English abstract)
- Qin NS (秦宁生), Shi XH (时兴和), Shao XM (邵雪梅), Wang QC (汪青春) (2008). Average maximum temperature change recorded by tree rings in west Sichuan Plateau. *Plateau and Mountain Meteorology Research* (高原山地气象研究), 28(4), 18–24. (in Chinese with English abstract)
- Rind D (2002). The Sun's role in climate variations. *Science*, 296, 673–677.
- Rolland C (1993). Tree-ring and climate relationships for *Abies alba* in the internal Alps. *Tree-Ring Bulletin*, 53, 1–11.
- Ropelewski CF, Halpert MS (1987). Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 115, 1606–1626.
- Schweingruber FH (1996). *Tree Rings and Environment. Dendroecology*. Paul Haupt Verlag, Bern.
- Shao XM (邵雪梅), Fan JM (范金梅) (1999). Past climate on west Sichuan Plateau as reconstructed from ring-widths of Dragon Spruce. *Quaternary Sciences* (第四纪研究), 1, 81–89. (in Chinese with English abstract)
- Shao XM (邵雪梅), Fang XQ (方修琦), Liu HB (刘洪滨), Huang L (黄磊) (2003). Dating the 1000-year-old Qilian Juniper in Mountains along the eastern margin of the Qaidam Basin. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 58, 90–100. (in Chinese with English abstract)
- Shao XM, Huang L, Liu HB, Liang EY, Fang XQ, Wang LL (2005). Reconstruction of precipitation variation from tree rings in recent 1000 years in Delingha, Qinghai. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 48, 939–949.
- Shao XM (邵雪梅), Wang SZ (王树芝), Xu Y (徐岩), Zhu HF (朱海峰), Xu XG (徐新国), Xiao YM (肖永民) (2007). A 3500-year master tree-ring dating chronology from the northeastern part of the Qaidam Basin. *Quaternary Sciences* (第四纪研究), 27, 477–485. (in Chinese with English abstract)
- Stokes MA, Smiley TJ (1968). *An Introduction to Tree-Ring Dating*. The University of Chicago Press, Chicago.
- Thomsen G (2001). Response to winter precipitation in ring-width chronologies of *Pinus sylvestris* L. from the northwestern Siberian Plain, Russia. *Tree-Ring Research*, 57, 15–29.
- Torrence C, Compo GP (1998). A practical guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 61–78.
- Tranquillini W (1979). *Physiological Ecology of the Alpine Timeberline*. Springer-Verlag, New York.
- Villalba R, Boninsegna JA, Veblen TT, Schmelter A, Rubulis S (1997). Recent trends in tree-ring records from high elevation sites in the Andes of Northern Patagonia. *Climate Change*, 36, 425–454.
- Wang T (王婷), Yu D (于丹), Li JF (李江风), Ma KP (马克平) (2003). Advances in research on the relationship between climatic change and tree-ring width. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 27, 23–33. (in Chinese with English abstract)
- Wang XC (王晓春), Zhou XF (周晓峰), Sun ZH (孙志虎) (2005). Research advances in the relationship between alpine timberline and climate change. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 24, 301–305. (in Chinese with English abstract)
- Wigley TM, Briffa KR, Jones PD (1984). On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23, 201–213.
- Wu P (吴普), Wang LL (王丽丽), Shao XM (邵雪梅) (2005).

- Reconstruction of summer temperature from maximum latewood density of *Pinus densata* in west Sichuan. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 60, 998–1006. (in Chinese with English abstract)
- Wu XD, Cheng Z, Sun L (1987). Status of dendrochronological work in China. *Dendrochronologia*, 5, 127–133.
- Xiao TG (肖天贵), Chen Y (堪芸) (1994). Relationship between El Niño events and some index of national economy of the Sichuan province. *Journal of Chengdu Institute of Meteorology* (成都气象学院学报), 30, 79–84. (in Chinese with English abstract)
- Yang B, Bräuning A, Shi Y (2003). Late Holocene temperature fluctuations on the Tibetan Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 22, 2335–2344.
- Yao TD (姚檀栋), Qin DH (秦大河), Yu BQ (徐柏青), Yang MX (杨梅学), Duan KQ (段克勤), Wang NL (王宁练), Wang YQ (王有清), Hou SG (侯书贵) (2006). Temperature change over the past millennium recorded in ice cores from the Tibetan Plateau. *Advances in Climate Change* (气候变化研究进展), 2, 99–103. (in Chinese with English abstract)
- Yuan YJ (袁玉江), Li JF (李江风) (1999). Reconstruction and analysis of 450's winter temperature series in the Urumqi river source of Tianshan Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology* (冰川冻土), 21, 64–70. (in Chinese with English abstract)
- Yuan YJ (袁玉江), Shao XM (邵雪梅), Wei WS (魏文寿), He Q (河清), Yu SL (喻树龙) (2005). On the relationship between tree-ring and cumulative temperature in mountainous area of Urumqi river and reconstruction of  $\geq 5.7^{\circ}\text{C}$  cumulative temperature. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 25, 756–762. (in Chinese with English abstract)
- Zhang QB, Cheng GD, Yao TD, Yao TD (2003). A 2,326-year tree-ring record of climate variability on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 30, 1739–1741.
- Zheng SW (郑绍伟), Li YQ (黎燕琼), He F (何飞), Chen H (陈泓), Su YM (宿以明), Liu XL (刘兴良) (2006). Comparison analysis and research on principal meterology factors inside & outside Wolong forest ecology station. *Journal of Chengdu University (Natural Science)* (成都大学学报(自然科学版)), 25, 210–213. (in Chinese with English abstract)

特邀责任编委: 熊利民 责任编辑: 王 蔚